三峡坝区干流及香溪河库湾水体秋季二氧化碳分压*

姚臣谌[1] 张 靖[1] 吴以赢[1] 王雨春[2] 姜艳兴[1] 高 洋[1] 汪福顺[1**]
([1]上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; [2]中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038)

摘 要 于2009年9月对三峡水库坝区干流以及坝区主要库湾-香溪河流域水体中溶解CO_2分压(pCO_2)进行了走航观测。结果表明:秋季香溪河表层pCO_2为150~240 μatm,三峡水库坝区干流表层pCO_2为920~1140 μatm;在干、支流交汇处的水柱剖面上,表层水体pCO_2最低为368 μatm,随着水深的增加,pCO_2急剧增大,在10 m达到最大值1300 μatm,10 m后保持不变;通过计算,香溪河和三峡水库坝区干流河道的CO_2释放通量分别为-4.74±1.15和(83.7±14.1) mmol·m^{-2}·d^{-1}。香溪河表现为CO_2的"汇",而三峡水库坝区干流表现为CO_2的"源"。在评价水库建设对周边区域CO_2通量影响时,不仅要考虑局部流域,更需要对整个研究地区进行综合考察。

关键词 温室气体; 二氧化碳分压; 香溪河; 三峡库区

中图分类号 X832 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)1-0152-06

Partial pressure of water body dissolved carbon dioxide in mainstream and Xiangxi bay of Three Gorges Reservoir area in autumn.

YAO Chen-chen[1], ZHANG Jing[1], WU Yi-ying[1], WANG Yu-chun[2], JIANG Yan-xing[1], GAO Yang[1], WANG Fu-shun[1**] ([1] *School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai* 200444, *China*; [2] *Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydroelectric Power Research, Beijing* 100038, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(1): 152-157.

Abstract: In September 2009, a cruise investigation was conducted to study the partial pressure of water body dissolved carbon dioxide (pCO_2) in the mainstream and Xiangxi River of the Three Gorges Reservoir Area in autumn. The pCO_2 in the surface water of the mainstream and Xiangxi River was 920-1140 and 150-240 μatm, respectively. At the joint area of mainstream and distributaries, the pCO_2 had a minimum of 368 μatm in surface water, and increased markedly with increasing water depth, being the maximum (1300 μatm) at 10 m depth and keeping stable downward. The CO_2 flux of the mainstream and Xiangxi River was 83.7±14.1 and -4.74±1.15 mmol·m^{-2}·d^{-1}, respectively, indicating that the mainstream was a sink, while Xiangxi River was a source of CO_2. Therefore, when evaluating the influence of reservoir construction on the CO_2 flux in reservoir's surrounding regions, it would be necessary not only considering the local basins, but also investigating the entire study area comprehensively.

Key words: greenhouse gas; partial pressure of carbon dioxide; Xiangxi River; Three Gorges Reservoir area.

关于水电是否仍然是清洁能源,近年来开始出现一些争议。有研究表明,水库具有较大的温室气体释放通量,某些水库生产单位电力所释放的温室气体甚至大于火电所产生的(Kelly, 1997; Duchemin *et al.*, 1995; St Louis *et al.*, 2000; Fearnside, 2002)。充足的有机质供应是水库产生并释放温室气体的重要前提。河流拦截筑坝后,淹没区原生植被、上游河流外源性有机质以及自生有机质的逐步降解都可以产生温室气体,并通过水气界面释放到大气中。由于该方面工作目前主要集中在热带、寒温带地区,简单地将这些地区的研究结论推广到中国的水库温室气体释放评估可能会产生严重的偏差。有学者也认为,由于中国建坝前的清库工作执

*国家自然科学基金项目(40873066和51079163)、上海市教委基金(12YZ017)和上海市青年科技启明星计划(08QA14029)资助。
**通讯作者 E-mail: fswang@shu.edu.cn
收稿日期: 2011-05-05 接受日期: 2011-10-08

行较为严格,水库蓄水会造成某些淹没的植物腐败造成大量温室气体排放的现象,出现在中国的可能性较小(张博挺, 2007)。

三峡大坝,作为世界著名水电工程一直受到极大的关注。然而作为一个河流筑坝拦截形成水库系统,三峡大坝的温室气体释放效应研究较少。相关数据、结论大多为粗略估算,如,Chen 等(2009)估算,包括三峡水库在内的中国水库是温室气体的重要来源。因此,于 2009 年秋季对三峡流域第一大支流-香溪河流域,以及三峡大坝上游部分地区进行了走航监测,探讨河道型水库温室气体释放的现状及机理。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

香溪河(110° 25′ E—111° 06′ E, 30° 57′ N—31°34′N)是三峡水库库区的第一大支流,其干流长 94 km,流域总面积 3099 km^2。由北向南贯穿兴山县全县,至峡口镇有高岚河汇入,于秭归县香溪镇注入长江(叶麟等, 2003)(图 1)。香溪河流域植被的垂直分布差异显著,森林覆盖率高达 60%(李凤清, 2008)。

1.2 样品的采集

我们于 2009 年 9 月,对三峡坝区干支流进行了走航监测。本次走航主要分为 2 个阶段,首先从峡口出发沿香溪河至长江干流交汇口(A),然后沿着长江干流向三峡大坝至距离大坝 28 km(B)处。利用自吸泵连续抽取水面下 0.5 m 水体进行 pCO_2 及相关水质参数的分析。在点 A 进行了分层剖面 pCO_2 分析:利用自吸泵间隔抽取不同深度水体,5 ~ 30 m 每间隔 5 m 取样,0 ~ 5 m 每间隔 1 m 取样分析。所有待测水体现场分析 pCO_2,同时用 YSI 水质参数仪测定 pH、T、DO。采样点见图 1。

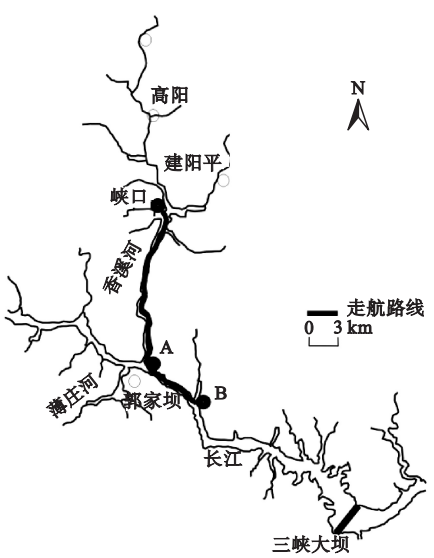


图 1 采样点分布示意图
Fig. 1 Geographic location of study area and sampling sites

1.3 分析方法

利用自制喷淋-鼓泡式平衡器-非分散红外检测器(CA-10)系统测定表层水中 pCO_2(Frankignoulle *et al.*, 2001; Abril *et al.*, 2006),该检测系统最低响应时间为 1 s,反应灵敏误差可以控制在 10% 以内,同时具备高分辨率(1 mg · L^{-1})。剖面监测从水体表面下方 30 m 处开始每间隔 5 m 稳定监测,至表面以下 5 m 处每隔 1 m 稳定监测直至表面。走航全程用 GPS 对路线进行定位。

1.4 数据处理

根据公式(1)计算亨利系数 $K_H^{CO_2}$(Weiss & Price, 1980):

$$\ln(K_H^{CO_2}) = -60.2409 + 93.4517/(T/100) + 23.3585\ln(T/100) + S[0.023517 - 0.023656(100T + 0.0047036(T/100)^2)] \quad (1)$$

式中,$T=t+273.15$,t 为摄氏温度,S 为盐度。

CO_2 于水气界面中扩散的通量可以用公式(2)计算:

$$F = k\rho K_H^{CO_2}(p_{water}CO_2 - p_{air}CO_2) \quad (2)$$

当 $F<0$ 时,表示 CO_2 由大气中向水体中扩散;当 $F>0$ 则表示 CO_2 由水体向大气扩散。($p_{water}CO_2 - p_{air}CO_2$)为大气与水体之间 CO_2 分压值之差,ρ 为水体的密度,k 为气体交换系数。

这种方法的重要参数是气体交换系数 k 与亨利系数 $K_H^{CO_2}$ 的乘积,由于 k 与 $K_H^{CO_2}$ 的温度效应相互抵消,气体交换系数受温度的影响通常可以忽略,而主要为风速的函数(Wanninkhof *et al.*, 1992)。现场观测确认气体交换系数与风速函数关系的方法有 10 余种(Front & Upstill-Goddard, 1999)。由于本研究整个走航监测区域的流速与风速相对较低(流速 <0.5 m · s^{-1}),因而可以参照 Cole 和 Caraco(1998)的经验公式(3)计算:

$$k = 2.07 + 0.215U^{1.7} \quad (3)$$

式中,U 为监测地区平均的风速。

2 结果与分析

2.1 研究区水体表层参数的变化

整个走航观测分为两部分,香溪河与三峡坝区长江干流区域。监测结果表明,库区干、支流表层水体水温变化不大,香溪河为24.3 ℃~25.2 ℃,三峡坝区附近干流为25.5 ℃~26.8 ℃。库湾支流香溪河表层水体的pCO_2变化范围为150~240 μatm,波动较小。三峡库区干流表层水体pCO_2变化范围为920~1140 μatm,显著高于香溪河。香溪河与长江干流汇合的过渡区域(A),监测的各项参数发生变化。香溪河河道表层水体DO和pH分别为5.9~7.8 mg·L^{-1}和8.2~8.8,三峡坝区表层水体DO和pH为5.1~4.6 mg·L^{-1}和7.7~7.5(图2)。

2.2 交汇处水体参数剖面变化

在交汇处(A点)进行了水体剖面监测(图3)。pCO_2最小值出现在水体表面为368 μatm,然后随着深度增大,迅速增加。在水面10 m以下,pCO_2相对稳定,变化范围为1210~1390 μatm。与pCO_2变化规律相反,pH、DO和叶绿素均是在表层水体最高,然后随着深度增加迅速下降,15 m后变化不大。

2.3 表层水体CO_2释放通量

根据现场得到的数据,在香溪河流域秋季平均风速在1~1.5 m·s^{-1},水流缓慢,根据公式(3)计算得出k值为2.285~2.498 cm·h^{-1}(0.549~0.599 m·d^{-1}),在计算此区域CO_2释放通量时取k平均值为2.391 cm·h^{-1}(0.574 m·d^{-1})。三峡坝区干流在采样期间平均风速为2~2.5 m·s^{-1},k值为2.768~3.091 cm·h^{-1}(0.664~0.742 m·d^{-1})。但是,由于三峡坝区干流地形变化复杂,并且伴有急速河道(流速>2 m·s^{-1}),水体进入河道流速与湍流度都有大幅度的提高且水体较浑浊,实际条件与Cole(1998)经验公式不符合。因此,在计算三峡坝区的k值时,通过借鉴Yao等(2007)对西江地区的研究(西江河风速为0.7~2.7 m·s^{-1},浑浊度中等,k值为8~15 cm·h^{-1}),三峡坝区的k取值为12 cm·h^{-1}。

通过计算,香溪河和三峡坝区干流河道的秋季CO_2释放通量分别为(-4.74±1.15)和(83.7±14.1) mmol·m^{-2}·d^{-1}。计算结果显示,香溪河表现为CO_2的汇,而坝区干流表现为CO_2的源。

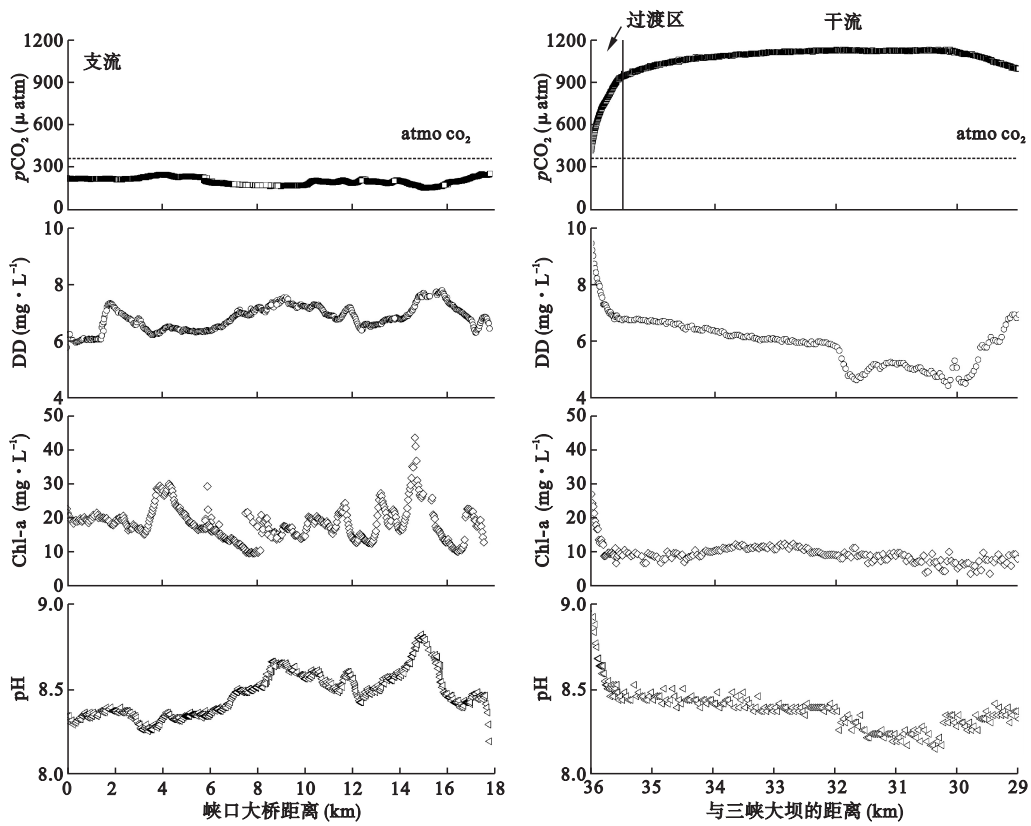


图2 研究区域夏季各因子变化

Fig. 2 Variations of the factors in summer in studied area

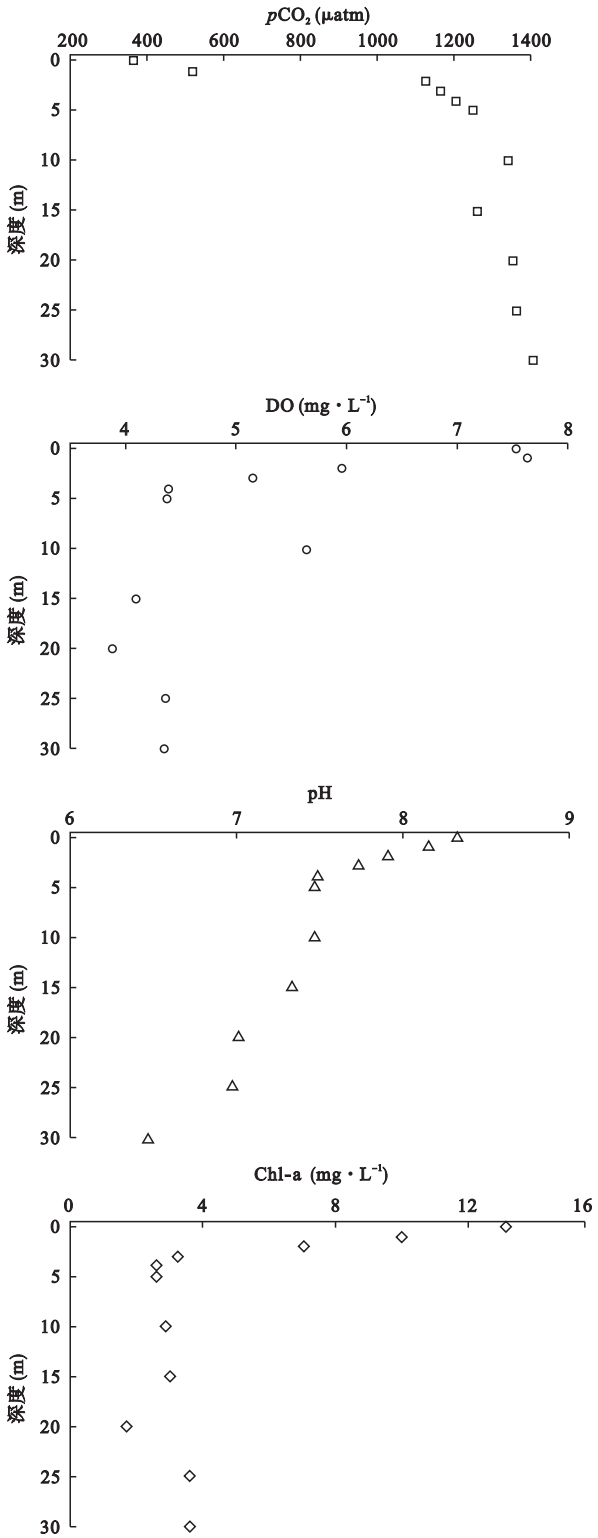


图 3　A 点剖面监测结果

Fig. 3　Result of vertical monitoring in point A

2.4　pCO_2与水化学参数相关性

由图 4 可见,研究区 DO 与 pCO_2之间存在显著的负相关关系,表明该地区水体 CO_2释放主要受到呼吸和光合作用的控制。

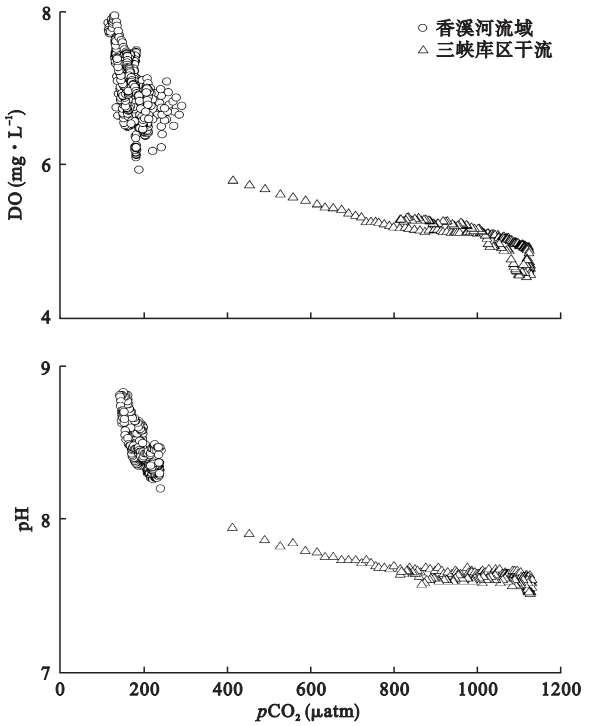


图 4　表层 pCO_2与水化学参数线性关系

Fig. 4　Relationship between surface pCO_2 and hydrochemistry parameters

从整个走航过程中 pCO_2的变化表现来看,香溪河流域 pCO_2较低(150 ~ 240 μatm),溶解氧饱和度与 pH 较高,该区域 CO_2分压受到水体微生物光合作用的影响较大。这主要与该地区地形与水利条件有关,香溪河流域水体流速缓慢为浮游植物的生长创造了有利条件,大部分该地区的水体溶解氧饱和度都超过了 6 mg · L^{-1},表现出较高的光合作用效率,大量吸收了水体中溶解 CO_2,并导致水体 pH 的显著上升。三峡坝区干流河段 pCO_2就要高出许多,该地区水体溶解氧饱和度普遍低于 5 mg · L^{-1},表明呼吸作用仍是控制 CO_2分压变化的主要因素,坝区水体仍处于"河流型"异养体系。

从图 5 可以看出,在垂直剖面上,pCO_2分别与 pH、DO 呈负相关关系。显然,光合作用在上层水体中占据主导作用,水中初级生产力通过光合作用大量消耗水体中溶解 CO_2,并释放 O_2。随着水体深度的增加,水体中无机碳平衡逐渐受呼吸作用控制。如,在水面 10 m 以下,水体具有更高的 pCO_2,同时 pH、DO 更低。

2.5　CO_2释放通量水平

对比世界上主要河流、水库的水气界面 CO_2交换通量可以看出(表1),河流大都为温室气体的源,

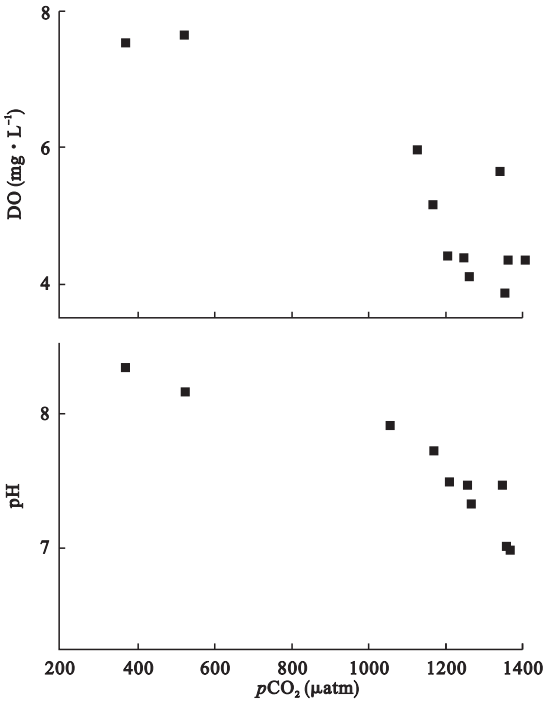


图5 剖面 pCO_2 与水化学参数线性关系

Fig. 5 Relationship between pCO_2 and hydrochemistry parameters along the water column

表1 世界上主要水库、河流水气界面 CO_2 交换通量

Table 1 Exchange flux of CO_2 between water and air in main reservoirs and rivers of the world

水体	名称	国家	水气界面 CO_2 交换通量 ($mmol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)	文献来源
水库	Petit Saut	圭亚那	101.36	St Louis *et al.*, 2000
	Lokkaf	芬兰	24.00	Huttunen *et al.*, 2002
	Porttipahtaf	芬兰	35.00	Huttunen *et al.*, 2002
	Dworshak	美国	-23.41	Soumis *et al.*, 2004
	Shasta	美国	30.82	Soumis *et al.*, 2004
	Curua-Una	巴西	65.91	Dos Santos *et al.*, 2006
	Tucurui	巴西	192.61	Dos Santos *et al.*, 2006
	Samuel	巴西	361.77	St Louis *et al.*, 2000
	Laforge-1	加拿大	52.27	St Louis *et al.*, 2000
	洪家渡水库	中国	6.14	喻元秀等, 2008
	万安水库	中国	12.74	梅航远等, 2011
	新安江水库	中国	7.03	姚臣谌等, 2010
河流	Amazon	巴西	559.30	Ternon *et al.*, 2002
	Xijiang	中国	273.55	Yao *et al.*, 2007
	St. Lawrence	加拿大	118.29	Hélie *et al.*, 2002
	Ottawa	加拿大	105.43	Telmer & Veizer, 1999
	香溪河(秋季)	中国	-4.74	本研究
	三峡坝区(秋季)	中国	83.7	本研究

其水气界面 CO_2 交换通量要大大高于水库。然而，在本研究中，可以明显发现香溪河流域秋季是 CO_2 的汇，其 CO_2 交换通量要远低于大部分的水库。虽然坝区干流在秋季的 CO_2 交换通量明显高于库湾地区，但是作为河道干流相对于 Amazon 河要低很多，比起加拿大的 St. Lawrence、Ottawa 河，以及我国的西江都要低，也低于热带水库。

通常情况下，可以在河流的干道监测到相当高的 CO_2 分压值。这是由于河流水体携带有大量流域内有机质，受到呼吸作用的影响。同时由于干流水体往往有着很高流速与湍流度，加速了水体中 CO_2 分压向大气扩散速率(梅航远, 2011)。因而在多种因素的综合作用下，此类地区为明显的温室气体“源”。而相对的在部分支流区域，由于地理特性减缓了河流的流动性，水体流速与流量均受到了大幅度的限制，这为浮游植物的生长创造了条件，对河流水气界面 CO_2 交换通量的减缓有较为明显的作用。因此，在评价一个区域的 CO_2 分压时，不能只考虑局部的流域，而是需要对整个研究地区有综合性的考察。

3 结 论

大坝的建设会对周围生态环境造成明显的影响，通过对三峡水库坝区干流及其支流的调查，发现三峡坝区干流的 CO_2 分压要明显高于香溪河的 CO_2 分压。库区干流作为陆地生源要素向外界输送的通道，携带大量的有机质，在搬运过程中受呼吸作用降解有机质的影响，向大气释放了大量的 CO_2，为明显的温室气体“源”。然而支流地区由于地理特性的变化，往往会对一个地区的河流水气界面 CO_2 交换通量起到减缓的作用，是 CO_2 的“汇”，因此不能仅凭借某个地区局部温室气体通量来评价水库建造对大气 CO_2 是做出正面或者负面的贡献，而是需要对整个研究地区进行综合性的考察。

致谢 本研究在采样过程中，得到了三峡大学肖尚斌教授及其研究团队的大力支持，特此感谢！

参考文献

李凤清, 叶 麟, 刘瑞秋, 等. 2008. 三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态. 生态学报, **28**(5): 2074-2081.

梅航远, 汪福顺, 姚臣谌, 等. 2011. 万安水库春季二氧化碳分压的分布规律研究. 环境科学, **32**(1): 58-63.

姚臣谌, 汪福顺, 吴以赢, 等. 2010. 新安江水库水体春季二氧化碳分压的分布规律研究. 地球环境学报, **1**(2): 150-155.

叶 麟, 黎道丰, 唐 涛, 等. 2003. 香溪河水质空间分布特

性研究. 应用生态学报, **14**(11): 1959-1962.
喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 2008. 洪家渡水库溶解二氧化碳分压的时空分布特征及其扩散通量. 生态学杂志, **27**(7): 1193-1199.
张博挺. 2007. 绿色能源——水电的温室气体减排作用. 中国三峡建设, (1): 72-73.
Abril G, Richard S, Guérin F. 2006. In situ measurements of dissolved gases (CO_2 and CH_4) in a wide range of concentrations in a tropical reservoir using an equilibrator. *Science of the Total Environment*, **354**: 246-251.
Chen H, Wu Y, Yuan X. 2009. Methane emissions from newly created marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research*, **114**: 78-84.
Cole JJ, Caraco NF. 1998. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF_6. *Limnology and Oceanography*, **43**: 647-56.
Dos Santos MA, Rosa LP, Sikar B, *et al*. 2006. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energy Policy*, **34**: 481-488.
Duchemin E, Lucotte M, Canuel R, *et al*. 1995. Production of the greenhouse gases CH_4 and CO_2 by hydroelectric reservoirs of the boreal region. *Global Biogeochemical Cycles*, **9**: 529-540.
Fearnside PM. 2002. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the energy policy ìmplications. *Water, Air, and Soil Pollution*, **133**: 69-96.
Field CB, Raupach MR. 2003. The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World. USA: USA Island Press.
Frankignoulle M, Borges A, Biondo R. 2001. A new design of equilibrator to monitor carbon dioxide in highly dynamic and turbid environments. *Water Research*, **35**: 1344 - 1347.
Frost T, Upstill-Goddard RC. 1999. Air-sea gas exchange in the millennium: Progress and uncertainties. *Oceanography and Marine Biology*, **37**: 1-45.
Hélie JF, Hillaire-Marcel C, Rondeau B. 2002. Seasonal changes in the sources and fluxes of dissolved inorganic carbon through the St. Lawrence River: Isotopic and chemical constraint. *Chemical Geology*, **186**: 117-138.
Huttunen JT, Vaisanen TS, Heikkinen M. 2002. Exchange of CH_4, CO_2 and N_2O between the atmosphere and two northern boreal ponds with catchments dominate by peatlands or forest. *Plant and Soil*, **242**: 137-146.
Kelly CA, Rudd JWM, Bodaly RA. 1997. Increases in fluxes of greenhouse gases and methylmercury following flooding of an experimental reservoir. *Environmental Science & Technology*, **31**: 1334-1344.
Soumis N, Duchemin E, Canuel R. 2004. Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States. *Global Biogeochemical Cycles*, **18**: doi: 10. 1029/2003GB002197.
St Louis VL, Kelly CA, Duchemin E. 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. *Bioscience*, **50**: 766-775.
Telmer K, Veizer J. 1999. Carbon fluxes, $p(CO_2)$ and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: Carbon isotope perspectives. *Chemical Geology*, **159**: 61-86.
Ternon JF, Oudot C, Dessier A. 2000. A seasonal tropical sink for atmospheric CO_2 in the Atlantic ocean: The role of the Amazon River discharge. *Marine Chemistry*, **68**: 183 - 201.
Wanninkhof R. 1992. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, **97**: 7373-7382.
Weiss RF, Price RA. 1980. Nitrous oxide solubility in water and seawater. *Marine Chemistry*, **8**: 347-359.
Yao G, Gao Q, Wang Z. 2007. Dynamics of CO_2 partial pressure and CO_2 out gassing in the lower reaches of the Xijiang River, a subtropical monsoon river in China. *Science of the Total Environment*, **376**: 255-266.

作者简介 姚臣谌,男,1984 年生,硕士,从事水环境化学方面的研究。E-mail: yao_chenchen9@ yahoo. cn
责任编辑 魏中青